

白建方, 董士欣, 2018. 地震作用下场地有限元建模时底部边界条件的影响. 震灾防御技术, 13 (1): 41—51.
doi: 10.11899/zzyfy20180104

地震作用下场地有限元建模时 底部边界条件的影响¹

白建方 董士欣

(石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043)

摘要 用有限元方法对场地进行地震反应分析时需将半无限域的场地有限化。本文针对底部人工边界的设置, 采用滞回阻尼假设, 推导了同时包含辐射阻尼和材料阻尼的均质场地地表位移放大系数解析式, 进而研究了材料阻尼和辐射阻尼的变化对放大系数的影响。有限元建模时相当于忽略了辐射阻尼, 计算误差会随着所分析场地阻抗的增加而逐渐增大, 在共振区附近, 忽略任一种阻尼的影响, 都将显著地高估地表动力反应; 远离共振区, 阻尼的影响会迅速衰退。本文提出了通过增加场地材料阻尼来弥补所忽略的辐射阻尼的思路, 并给出了有限元建模时考虑辐射阻尼后新的材料阻尼的确定方法。

关键词: 底部人工边界条件 场地地震反应分析 有限元方法 辐射阻尼 材料阻尼

引言

实际的场地是半无限域空间, 在用有限元方法对其进行地震反应分析时, 首先涉及到的一个问题就是如何将此半无限域空间有限化。通常的做法是在水平向和竖向截取一定范围的土层进行分析, 即人为地引入了一些原本不存在的边界, 也就是所谓的人工边界 (Wolf, 1985)。为了减小这种人为的有限化处理可能对计算结果带来的影响, 我们需要让人工边界处的有限元节点满足一定的条件, 即人工边界条件。目前关于人工边界的研究多集中在侧向人工边界方面, 提出了诸如吸收边界、透射条件、自由场边界、远置侧移边界等被广泛应用的人工边界条件 (楼梦麟等, 2003; 陈昌斌等, 2006; Bielak 等, 1984)。底部人工边界影响方面的研究则相对较少。潘旦光等 (2004) 将基岩模拟成截面积按指数函数随深度变化的变截面剪切梁模型估计了基岩的弹簧刚度, 利用置于弹簧支座上的一维剪切梁模型分析了基岩的弹性刚度对土层地震反应的影响, 认为土层较厚、基岩刚度较大时, 基岩弹性刚度的影响很小。而在有限元分析中更为普遍的做法则是将底部视为固定边界, 即认为下卧基岩为无限刚体, 从而忽略了基岩弹性刚度带来的影响。本文通过对比均质场地地震反应分析的理论模型和有限元模型, 研究了底部边界问题的实质及将其视为固定边界时可能对计算结果带来的影响。在此基础上提出了一种通过增加场地材料阻尼来弥补所忽略掉的基岩辐射阻尼影响的计

1 基金项目 河北省大型基础设施防灾减灾协同创新中心项目和河北省重点学科建设项目 (桥梁与隧道工程)

[收稿日期] 2017-03-20

[作者简介] 白建方, 男, 生于1976年。博士, 讲师。主要从事工程系统抗震方面的研究。E-mail: bjf2004@126.com

算方法，并给出了相应的实现步骤。

1 问题的提出

1.1 场地地震反应分析的理论模型（波在分层介质中的传播）

对于基岩上覆均匀土层来说，理论波动解的物理模型由两个界面（土与空气接触面和岩石与土接触面）、一个土层、一个半无限岩石层组成（图 1）。需明确一个问题，就是所谓的岩石与土层的下分界面虽为一个很薄的面，但可以认为其包含了界面上表面和界面下表面。场地地震反应分析理论波动解的问题可描述为：垂直入射的 P 波、SV 波或以任意角度入射的 SH 波入射到下界面的下表面，经下表面的反射形成的反射波返回岩石层向无限域传播不再回来，同时穿过界面由该界面的下表面到达上表面形成折射波经土层向上传播。我们关注的是土层内这一折射波的传播过程，如果将波到达下界面的上表面时间定为 0 时刻，则折射波经过 h/c (h 指土层厚度， c 代表波在土层的传播速度) 之后到达上界面（土与空气交界面），在其表面只发生反射，反射系数为 1，地表振幅为 2 倍入射波振幅。反射波经 h/c 后到达下界面，一部分经折射后向下传向无限域的岩层，另一部分经过反射后又向上传播，再经 h/c 后又到达地表。如此反复，可知，如果时间持续较久的话，地表实际振动是由一条折射波再加上无数次该折射波在土层上下界面的反射形成的反射波叠加组成。当然每次在界面的反射需满足反射条件，反射后的波振幅需乘以反射系数。这就是分层介质中的波动理论解（萨瓦林斯基，1981）。文献（廖振鹏，2002）中给出了地表任一时刻位移计算公式（式（1））。

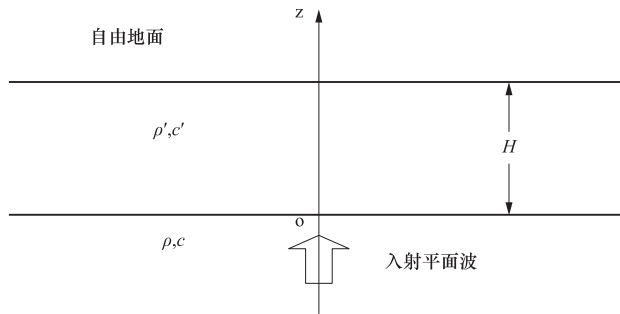


图 1 理论模型

Fig. 1 Theoretical model

$$U(H) = \frac{T_{21} U_f \exp\left(\frac{-i\omega H}{c'}\right)}{1 - R_{12} \exp\left(\frac{-i2\omega H}{c'}\right)} \quad (1)$$

其中， $U(H)$ 代表地表位移； $T_{21} = \frac{2}{1+\alpha}$ ，为入射波由下半空间（基岩）传入覆盖层中的透射系数； $R_{12} = \frac{\alpha-1}{\alpha+1}$ ，为覆盖层中下行波在 $z=0$ 处（基岩与土层交界处）的反射系数； $\alpha = \frac{\rho'c'}{\rho c}$ ，为覆盖层与基岩两种介质的阻抗之比； ρ' 和 c' 为覆盖层土层的密度和剪切波速， ρ 和 c 为基

岩的密度和剪切波速； H 为土层厚度； U_f 为基岩露头位移（假设没有覆盖层时在基岩表面测得位移）； ω 为激振频率。

放大系数，即 $U(H)$ 与 U_f 之比为：

$$\frac{U(H)}{U_f} = \frac{T_{21} \exp\left(-\frac{i\omega H}{c'}\right)}{1 - R_{12} \exp\left(-\frac{i2\omega H}{c'}\right)} \quad (2)$$

令 $\beta = \frac{\omega H}{c'}$ ，则：

$$\left| \frac{U(H)}{U_f} \right| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \beta + \alpha^2 \sin^2 \beta}} \quad (3)$$

由公式 (3) 可看出，随着阻抗之比 α 的增大，自由表面的运动可能减小。这是因为 α 越大，从下部介质进入覆盖层中的能量越小，大部分能量将散失于下半空间。这一能量散失的效果类似于在刚性基底的封闭体系中增加了介质阻尼，我们将这个等效的阻尼称为辐射阻尼， α 称为辐射阻尼系数（廖振鹏，2002）。

1.2 场地地震反应分析的有限元模型

通常用有限元方法对场地进行建模时只建土层的模型。即有限元模型由一个土层及其上下两个界面组成。上界面自由，可真实模拟实际土层与空气接触面波的反射特性。下界面一般是固定的，相当于假设下卧基岩是无限刚体，也就是公式 (3) 中令 $\alpha = 0$ 的情况，将无法模拟真实岩石与土层界面的物理特性。用有限元方法进行场地地震反应分析时，地震波由底部边界输入，相当于波动模型中基岩与土层接触面的入射波。

1.3 底部边界的设置所带来的两个问题

与理论模型对比可以发现，有限元模型在设置了底部边界后会引发两个问题：①有限元模型底部固定边界无法模拟真实土层中波由上界面（土层与空气分界面）反射回向下传播的波到达下界面（土层与基岩交界面）后经下界面的折射情况（实际中是存在的）；②通常对于实际工程来说，尤其是土层厚度较大的情况，有限元模型的下边界很难取到基岩面（模型尺寸会很大，计算量也将非常大），一般选取满足一定条件的土层界面作为假想基岩面来输入地震波。

关于第二个问题，即所取的不再是实际基岩面时会对计算结果带来哪些影响，目前已有许多研究成果可资借鉴（沈建文，2004；戴国莹等，2005；李建亮等，2015）。本文只关注第一类问题的影响。

2 考虑材料阻尼时地表放大系数解析解

为考虑材料阻尼的影响，采用滞回阻尼假设时，仅需用下面的复波速代替式 (1) 中的剪切波速即可（廖振鹏，2002）。

$$c^* = \sqrt{\frac{G^*}{\rho'}} = c' \sqrt{1 + 2\xi i} \approx c'(1 + \xi i) \quad (4)$$

式中 $G^* = (1 + 2\xi i)G$ ，为复弹模， G 为土层介质弹性模量， ξ 为反映材料阻尼大小的滞回阻尼

比。在推导上述公式时已经采用了阻尼比较小时忽略其二次项的假设。

采用滞回阻尼后, 公式 (1) 变为:

$$U(H) = \frac{T_{21} U_f \exp\left(\frac{-i\omega H}{c^*}\right)}{1 - R_{12} \exp\left(\frac{-i2\omega H}{c^*}\right)}$$

进一步整理得:

$$U(H) = \frac{T_{21} U_f \exp\left(-\omega \frac{\xi}{c'} H\right) \exp\left(\frac{-i\omega H}{c'}\right)}{1 - R_{12} \exp\left(-\frac{2\omega \xi}{c'} H\right) \exp\left(\frac{-i2\omega H}{c'}\right)}$$

放大系数为:

$$\frac{U(H)}{U_f} = \frac{T_{21} \exp\left(-\omega \frac{\xi}{c'} H\right) \exp\left(\frac{-i\omega H}{c'}\right)}{1 - R_{12} \exp\left(-\frac{2\omega \xi}{c'} H\right) \exp\left(\frac{-i2\omega H}{c'}\right)}$$

将 T_{21} , R_{12} 代入上式, 并令 $\beta = \frac{\omega H}{c'}$, 则:

$$\begin{aligned} \frac{U(H)}{U_f} &= \frac{2}{1 + \alpha} e^{-\xi\beta} e^{-i\beta} \\ &= \frac{2}{1 - \frac{\alpha-1}{\alpha+1} e^{-2\xi\beta} e^{-2i\beta}} \\ \left| \frac{U(H)}{U_f} \right| &= \frac{1}{\sqrt{(\alpha \sinh \xi\beta + \cosh \xi\beta)^2 + (\alpha^2 - 1) \sin^2 \beta}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \beta + \alpha^2 \sin^2 \beta + \sinh^2 \xi\beta + \alpha^2 \sinh^2 \xi\beta + \alpha \sinh 2\xi\beta}} \end{aligned} \quad (5)$$

公式 (5) 即为同时考虑了辐射阻尼 α 和材料阻尼 ξ 影响时的地表位移放大系数解析式。令公式 (5) 中的 $\xi = 0$ 则退化为仅含辐射阻尼影响的式 (3), $\alpha = 0$ 则退化为仅含材料阻尼影响时的放大系数计算式 (6):

$$\left| \frac{U(H)}{U_f} \right| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \beta + \sinh^2 \xi\beta}} \quad (6)$$

公式 (6) 其实等同于有限元建模时不考虑辐射阻尼影响时的均质场地地表放大系数的计算结果。

当然若同时令 $\alpha = 0$, $\xi = 0$, 则可得:

$$\left| \frac{U(H)}{U_f} \right| = \frac{1}{\cos \beta} \quad (7)$$

可以看出, 对于实际场地来说, 影响其动力反应大小的因素不仅有反映激振频率特性的

参数 β ，还有反映场地材料阻尼效应的参数 ξ ，以及反映基岩弹性刚度影响的辐射阻尼参数 α 。下面我们分别研究动力反应随这些参数的变化规律以及有限元建模时忽略 α 后可能产生的影响。

3 参数分析

3.1 材料阻尼的变化对动力反应结果的影响

令 $\alpha = 0$ 时，利用公式 (6)，改变 ξ 的大小，可得出一系列放大系数随 β 的变化曲线，如图 2 所示。

由图 2 可以看出，当不考虑辐射阻尼，即假设土层下卧基岩为无限刚体时，土层材料阻尼的大小对地表动力反应有显著的影响。在共振时，阻尼的大小对计算结果影响最大，阻尼比为 0 时，地表反应无限增大；只要设置很小的阻尼比，如 5% 时，其峰值就会迅速降低；远离共振区后，材料阻尼的影响几乎可以忽略不计；仅考虑材料阻尼时地表动力反应随着激振频率的增加有减小的趋势，即高阶振型衰减更快。

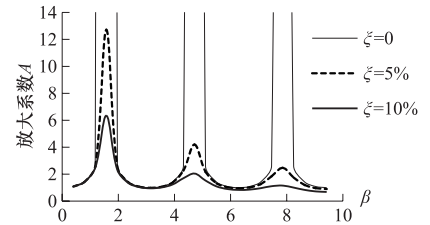


图 2 材料阻尼的影响

Fig. 2 The effect of the material damping

3.2 辐射阻尼的变化对动力反应结果的影响

令 $\xi = 0$ ，利用公式 (3)，改变 α 的大小，可得出考虑材料阻尼时辐射阻尼的大小对放大系数的影响规律，如图 3 所示。

为了进一步分析放大系数随 α 的变化规律，针对共振时 ($\beta = \pi/2$) 得到了放大系数随 α 的变化趋势，如图 4 所示。

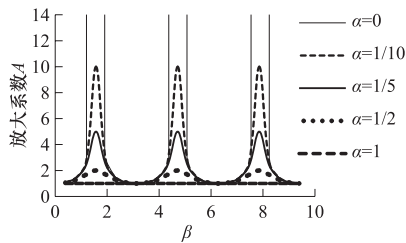


图 3 辐射阻尼的影响

Fig. 3 The effect of the radiation damping

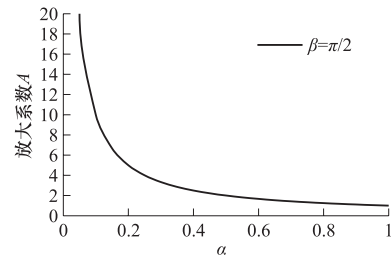


图 4 共振时放大系数随 α 的变化规律

Fig. 4 The change of the amplification with α under $\beta = \pi/2$

由图 3 可看出，当 $\alpha = 0$ 时，下卧基岩阻抗远大于上覆土层的阻抗，此时上覆土层中的波在基岩与土层界面处不会发生透射而完全反射回土层内部，与有限元的假设将一致。随着 α 的增加，也就是随着辐射阻尼的增大，地表动力反应迅速减小。当 $\alpha = 1$ 时，相当于基岩与土层阻抗一致的均匀半空间模型，此时放大系数最小且与单层介质地表放大系数一致；对于实际场地，多半 $\alpha < 1$ ，在此情况下，即使没有材料阻尼，共振时动力反应也不会无限增大。与材料阻尼不同的是，辐射阻尼对每一阶振型的影响程度几乎是一样的，并不会随着激振频率的变化产生明显的不同。

图 4 则显示了上下层介质的物理特性差距越大，即土越软，岩石越硬（此时 α 越小），则振幅越大；反之，随着 α 的增加，即土介质越来越硬，振幅会越来越小。换言之，利用有限

元方法对场地进行地震反应分析时,采用底部固定边界条件,相当于令 $\alpha=0$,对于越软的场地如深厚覆盖层,结果越接近于理论解;而场地土层越硬,忽略 α 带来的影响就越大,误差也会越大。

3.3 不同阻尼类型对动力反应的影响

公式(5)为同时考虑辐射阻尼和材料阻尼的解析解,以此作为参考标准,我们分别利用公式(3)和公式(6)可以得出仅考虑辐射阻尼和仅考虑材料阻尼时地表位移放大系数的计算结果。以花岗岩上覆砂土层为例,此时 $\alpha \approx 1/6$ 。不同阻尼模型下的放大系数如图5和图6所示。

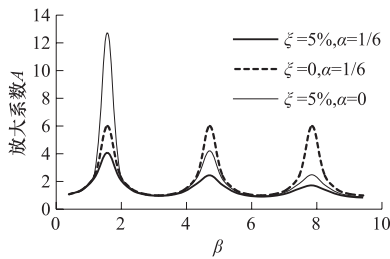


图5 $\xi = 5\%$ 的结果

Fig. 5 The result for $\xi = 5\%$

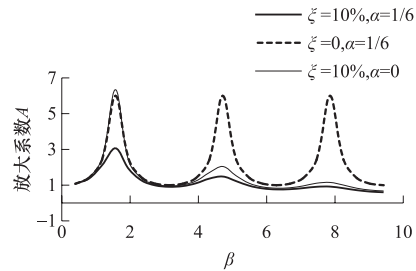


图6 $\xi = 10\%$ 的结果

Fig. 6 The result for $\xi = 10\%$

通过对比图5和图6发现,不管是哪一类阻尼都只在共振时会有明显影响,远离共振区后几乎没什么差别;仅考虑辐射阻尼或仅考虑材料阻尼都会高估地表的动力反应;尤其是在第1阶共振频率附近,忽略任何一种阻尼都将产生明显的误差;仅考虑辐射阻尼时会显著高估后续高阶振型的反应;通过增加材料阻尼可以一定程度上减小由于忽略辐射阻尼带来的影响。

表1为共振时($\beta = \pi/2$)采用不同阻尼模型、不同阻尼大小时计算的地表位移放大系数。

表1 共振时的地表动力放大系数
Table 1 The amplification under $\beta = \pi/2$

参数	$\xi=0$	$\xi=5\%$	$\xi=10\%$	$\xi=15\%$
$\alpha=0$	$+\infty$	12.72	6.34	4.21
$\alpha=1/10$	10	5.59	3.86	2.94
$\alpha=1/5$	5	3.58	2.78	2.56
$\alpha=1/2$	2	1.72	1.51	1.33
$\alpha=1$	1	0.92	0.86	0.79

4 有限元建模时场地阻尼的模拟

需要指出的是,无论是利用现有的商业软件还是自己开发有限元程序,要想在有限元模型的底部边界处完全模拟出真实的土层与基岩的接触面在波传播过程中的物理特性将是非常困难的(或者效果不理想,或者计算规模会大幅度增加)。所以目前常规的做法是,建模时采用底部固定边界,也就是相当于完全不考虑辐射阻尼的影响(即令 $\alpha=0$ 的情况)。

上述分析可以发现,对于软弱场地,这种做法带来的误差一般不会太大。但是对于较硬

场地，尤其是共振时，将会明显高估地表的动力反应（如表 1 所示）。同时从表 1 还可以看出，随着材料阻尼的增加，动力反应的结果也会明显降低。由此我们想到在用有限元建模时，是否可以通过增加材料阻尼的方式来弥补忽略辐射阻尼的影响呢？下面将给出进一步分析。

假设某场地在动力荷载很小时处于线弹性范围。地表动力放大系数可由公式（3）计算。由于有限元分析时无法考虑辐射阻尼的影响，只能采用类似公式（6）的方式进行计算。令两种情况下动力放大系数一致，即：

$$\frac{1}{\sqrt{\cos^2 \beta + \sinh^2 \xi \beta}} = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \beta + \alpha^2 \sin^2 \beta}}$$

由此解出阻尼比参数为：

$$\xi = \frac{\operatorname{arcsinh}(\alpha \sin \beta)}{\beta} \quad (8)$$

这样，相当于重新构造了一个包含材料阻尼而没有辐射阻尼的场地，通过令动力反应结果一致来求出其材料阻尼作为有限元分析时阻尼比设置的依据。

因此，对于某一处于线弹性范围的均质场地，我们可以先根据勘探资料确定阻抗之比 α ，然后根据场地的深度和激振频率得到 β ，就可以根据公式（8）求出有限元分析时需要附加的材料阻尼的大小。

在 $\beta = \pi/2$ 和 $\beta = \pi/6$ 时，由公式（8）可得所需附加的材料阻尼比如图 7 所示。可以看出，在 α 相同的情况下非共振时需要附加的材料阻尼大于共振的情况，且基本上都与 α 成正比。

在 $\alpha = 1/6$ 和 $\alpha = 1/2$ 时，由公式（8）所求得的材料阻尼比随着 β 规律变化，如图 8 所示。可以看出，随着土层阻抗的增加，需要附加的材料阻尼比也有明显的增大，尤其是在 1 阶共振区附近更为明显。

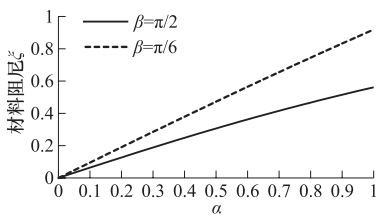


图 7 材料阻尼随 α 的变化

Fig. 7 The change of the material damping with α

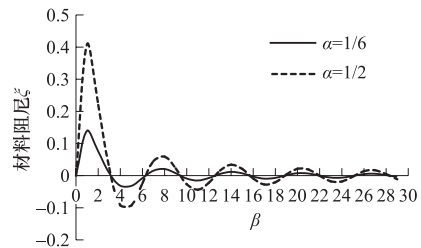


图 8 材料阻尼随 β 的变化

Fig. 8 The change of the material damping with β

在动力荷载较大时，土体进入弹塑性阶段，需同时考虑材料阻尼和辐射阻尼的影响，理论上可由公式（5）求其放大系数。采用有限元分析时，由于无法考虑辐射阻尼，可以通过增加材料阻尼的办法来减小这一影响。

设有限元模型中场地新的材料阻尼比为 ξ' ，由公式（6）可得在此阻尼比下动力放大系数为：

$$\left| \frac{U(H)}{U_f} \right| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \beta + \sinh^2 \xi' \beta}}$$

对于同时包含辐射阻尼和材料阻尼的实际场地,其放大系数可由公式(5)计算,然后令两者相等,即可由下式求出新的材料阻尼比 ξ' 。

$$\sinh^2 \xi' \beta = \alpha^2 \sin \beta + \sinh^2 \xi \beta + \alpha^2 \sinh^2 \xi \beta + \alpha \sinh 2\xi \beta \quad (9)$$

在共振情况下($\beta = \pi/2$),由式(9)可分别得到对应于 $\xi = 5\%$ 和 $\xi = 10\%$ 时 ξ' 随辐射阻尼 α 的变化规律,如图9所示。可以看出,在 $\alpha = 0$ 时新的材料阻尼比等于实际场地的材料阻尼比。随着 α 的增加, ξ' 几乎与 α 成正比,在 α 相同的情况下,其数值会随着原材料阻尼比的增加而增大。比如,若实际场地 $\xi = 10\%$, $\alpha = 0.2$ 时,从图上可以看出此时需要在有限元分析时将新的材料阻尼比设定到20%以上才可以取得与同时考虑辐射阻尼和材料阻尼相同的效果。

在 $\xi = 10\%$ 的情况下还可以由公式(9)分别求出当 $\alpha = 1/6$ 和 $\alpha = 1/2$ 时, ξ' 随着 β 的变化规律,如图10所示。同样可以看出,随着土层阻抗的增加(通常意味着场地变硬),新的材料阻尼比也会增大;在1阶共振区附近 ξ' 的大小受辐射阻尼的影响很明显,而随着激振频率的增加,其数值会迅速衰减,直到趋于场地实际的材料阻尼比。

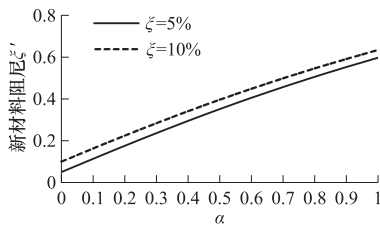


图9 新的材料阻尼比随 α 的变化

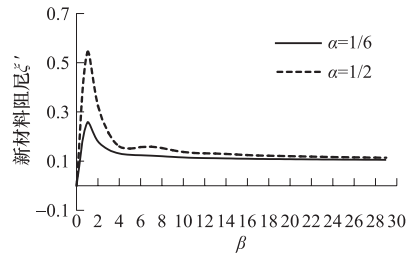


图10 新材料阻尼比随 β 的变化

Fig. 9 The change of the new material damping with α Fig. 10 The change of the new material damping with β

综上,对实际均质场地进行有限元分析时,若需要同时考虑辐射阻尼和材料阻尼的影响,可按下述步骤确定有限元分析时新的材料阻尼比参数:

- (1) 根据勘探资料或类似工程确定阻抗之比 α ;
- (2) 根据场地条件和规范要求确定 β ;
- (3) 通过室内试验确定场地土的滞回阻尼比 ξ ;

(4) 按公式(9)求出新的阻尼比参数 ξ' ,此即为同时考虑了实际场地辐射阻尼和材料阻尼影响的新的材料阻尼比。

最后需要指出的是,在实际工程中,若土层与基岩阻抗之比相差很大,如 α 很小的深厚覆盖土层或沿海地区典型的淤泥质软土地场,并且激振频率又远离共振区时,采用常规的底部固定边界条件进行有限元分析带来的误差并不明显。此时由于忽略了一部分透射到下半空间的波的能量,其所计算的土层表面的动力反应结果往往是偏大的,由此进行设计一般也会偏于安全。

5 算例分析

设有一均质场地模型,土层深度为 $H=10\text{m}$,土层剪切波速为 $v'=200\text{m/s}$,密度 $\rho'=2000\text{kg/m}^3$,泊松比 $\nu=0.3$,弹性模量 $E=212\text{MPa}$,场地卓越频率为 5Hz ;下卧基岩的剪切波速 $v=800\text{m/s}$,密度 $\rho=2500\text{kg/m}^3$ 。场地土层与基岩的阻抗之比为 $\alpha=1/5$ 。输入 $u(t)=$

$0.01\sin\omega t$ 正弦波作为基岩位移，激振频率等于场地的卓越频率，土层阻尼比为 10%。分别利用解析公式和有限元方法求解该场地的地表动力反应。

利用有限元软件 PLAXIS 2D (刘志祥等, 2015) 进行该场地的地震反应分析, 底部采用固定边界。为消除侧向人工边界的影响, 取水平距离为 400m (单侧人工边界距离为深度的 20 倍), 有限元模型如图 11 所示。有限元分析所得地表位移的动力放大系数为 6.57。



图 11 场地有限元模型

Fig. 11 The finite element model of site

利用公式 (6) 可得忽略辐射阻尼时 (即假设基岩刚度无穷大, 相当于底部固定边界) 地表位移动力放大系数的理论解为 6.34。考虑到有限元分析时侧向边界及单元划分的影响, 该结果与有限元结果基本一致, 从而印证了文中公式的正确性。

利用公式 (5) 可进一步得到, 同时考虑基岩辐射阻尼和场地材料阻尼时的地表动力放大系数为 2.78, 此时有限元结果的误差约为 136%。可见, 对于该场地来说, 当完全忽略掉基岩的弹性刚度时, 将高估地表的动力反应 (约为理论值的 2.36 倍)。

若按照本文第 4 节的方法, 利用公式 (9) 可求出考虑了辐射阻尼后场地新的材料阻尼比为 22.46%, 以此代替场地原材料阻尼比 10%, 其他条件保持不变, 重新进行有限元分析, 可得地表位移的动力放大系数为 3.07。通过与公式 (5) 的结果对比, 可知此时有限元方法的计算误差约为 10%。由此可见, 对于该均质场地模型, 当采用本文建议的方法重新确定场地材料阻尼比后, 有限元计算结果的精度会得到显著的提高。

6 结论

本文通过对比场地地震反应分析的理论模型和有限元模型, 指出了采用底部固定边界可能带来的影响。结合滞回阻尼假设, 推导了同时包含辐射阻尼和材料阻尼时均质场地地表位移动力放大系数的解析表达式。通过参数分析, 分别研究了各类阻尼的大小对动力反应结果的影响规律, 并提出了通过增设场地材料阻尼来弥补忽略基岩辐射阻尼的计算方法。主要研究结论有:

(1) 建立了较完整的均质场地地表位移放大系数解析式, 能够同时考虑激振频率特性、场地材料阻尼特性以及反映基岩弹性刚度的辐射阻尼效应的影响。为进行均质场地动力反应的理论研究奠定了基础。

(2) 在有限元分析中, 将底部边界视为固定, 相当于完全不考虑土层内的波传到土层与基岩接触面时的透射现象, 会高估地表动力反应结果, 尤其是当场地和下卧基岩之间的阻抗相差不是很大时 (例如坚硬场地), 会大幅增加土层地震反应的计算误差, 从而影响我们对实际场地在地震作用下可能产生的动力反应的判断; 对于阻抗较小的深厚软弱场地, 由于此时场地和基岩阻抗之比较小, 采用固定边界, 即忽略辐射阻尼带来的影响一般不大。

(3) 不管是材料阻尼, 还是辐射阻尼, 在共振区附近, 都对动力反应结果影响显著, 远离共振区后影响迅速减小; 其中材料阻尼对高阶振型的影响更加明显, 而辐射阻尼对每一阶

振型的影响几乎一样。

(4) 用有限元方法对场地进行地震反应分析时, 通常底部采用固定边界, 相当于忽略掉了基岩处辐射阻尼的影响。此时可通过增加场地材料阻尼的方式来减小这一影响带来的误差。针对均质场地模型, 给出了考虑辐射阻尼后场地新的材料阻尼比的计算公式和步骤, 并通过算例验证了所提方法的可行性。

参考文献

- 陈昌斌, 楼梦麟, 陶寿福, 2006. 二维场地地震反应有限元分析的问题探讨. 震灾防御技术, **1** (4): 292—301.
- 戴国莹, 王亚勇, 2005. 房屋建筑抗震设计. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 李建亮, 李福海, 彭晋川等, 2015. 不同的地震动输入面对地震反应分析结果的影响. 震灾防御技术, **10** (3): 522—530.
- 廖振鹏, 2002. 工程波动理论导论. 北京: 科学出版社.
- 刘志祥, 张海清, 2015. PLAXIS 高级应用教程. 北京: 机械工业出版社.
- 楼梦麟, 潘旦光, 范立础, 2003. 土层地震反应分析中侧向人工边界的影响. 同济大学学报, **31** (7): 757—761.
- 潘旦光, 楼梦麟, 2004. 基岩弹性刚度对土层地震反应的影响. 地震工程与工程振动, **24** (4): 158—163.
- 萨瓦林斯基, 1981. 地震波. 段星北, 译. 北京: 科学出版社.
- 沈建文, 2004. 上海市地震动参数区划. 北京: 地震出版社.
- Bielak, J. and P. Christiano, 1984. On the effective seismic input for non-linear soil-structure interaction system. Earthquake Eng. Struct. Dyn., **12**, 107—119.
- Wolf J. P., 1985. Dynamic soil-structure interaction. New Jersey: Prentice-Hall.

The Effect of the Bottom Boundary Condition on Site Finite Element Modeling under Earthquake Load

Bai Jianfang and Dong Shixin

(Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract The actual site is a semi-infinite space and not only on the horizontal direction, but also on the downward are infinitely. In order to build the numerical model for site through direct finite element method, we have to account the artificial boundary conditions first because it is the foundation of how to consider the scope of soil site. In common used method the interface between overlaying bedrock and soil is assumed to be the fixed bottom boundary. In order to find the effect created from this bottom boundary condition, in this paper we performed the theoretical analysis and numerical tests. On this base, we studied the effect of the radiation damping and material damping on the site dynamic response under earthquake load, and it would be possible to decrease the influence of the bottom boundary condition by increases the material damping.

Key words: The bottom boundary condition; Site earthquake response analysis; Finite element method; Radiation damping; Material damping